第 42 卷 第 4 期 2024 年 12 月
天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY
Vol. 42, No. 4 Dec., 2024

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.04.07

伽马暴 GRB 221009A 的观测角限制

林一清[1,2]

(1. 厦门理工学院 福建省光电技术与器件重点实验室，厦门 361024； 2. 厦门理工学院 光电与通信工程学院，厦门 361024)

摘要： GRB 221009A 被称为“史上最亮”(BOAT) 的伽马射线暴，在所有波长下被许多卫星探测到。它是迄今为止观测到的具有最高各向同性能 ($E_{\rm iso} \approx 1.5 \times 10^{48}$J)、离地球较近（红移为 $z = 0.151$）的伽马射线暴。伽马暴的辐射起源于相对论喷流，它们的各项同性能可能取决于喷流的内禀能量、喷流的张角和相对喷流的观测角。根据长暴的 $E_{\rm p,i}$-$E_{\rm iso}$ 关系和 Γ-$E_{\rm iso}$ 关系，估算了 GRB 221009A 的观测视线与喷流边缘的夹角 $\theta^{'}_{\rm obs}$ 和洛伦兹因子 Γ，结果为 $\Gamma = (4.23 \pm 2.81) \times 10^3$，观测角 $\theta^{'}_{\rm obs} = (0.03 \pm 0.01)^\circ$。这个结果表明，对于 GRB 221009A，观测视线与喷流边缘的夹角非常小，即 GRB 221009A 是正轴观测，这可能是 GRB 221009A 具有最高各向同性能的原因之一。

关 键 词： 伽马射线暴；喷流；相对论过程

中图分类号： P172.3 **文献标识码：** A

1 引 言

伽马射线暴 (gamma-ray burst, GRB) 是恒星层次、来自于宇宙空间（红移分布范围为 0.008 5 ~ 9.4）的伽马射线在短时间内的剧烈爆发现象。经典的 GRB 分类是简单地根据 GRB 瞬时辐射的持续时间 T_{90}（T_{90} 指光子数累积从 5% 到 95%），把 GRB 分为长暴 ($T_{90} > 2$ s) 和短暴 ($T_{90} < 2$ s) 两种类型[1]。长短暴的瞬时辐射可能分别由大质量恒星坍缩和双致密星（双中子星或中子星和黑洞）并合所发射的相对论性准直外流（喷流）产生。观测上，伽马暴的各向同性能分布跨度为 8 个量级（约 $10^{39} \sim 10^{47}$ J），且 $E_{\rm iso}$ 通常跟随着一个简单的幂律分布，这个幂律分布在高于 $(1 \sim 3) \times 10^{47}$ J 处有一个截断[2]。在对 GRB 的 55 年的观测中，GRB 170817A 具有最低的各向同性能 $E_{\rm iso} \approx 10^{39}$ J，几次最大能量的爆发

收稿日期： 2024-01-24； **修回日期：** 2024-05-17

资助项目： 福建自然科学基金 (2021J011215)；厦门市青年创新项目 (3502Z20206077)；厦门理工学院校级教研教改项目 (JG2022-0123846)

通讯作者： 林一清，yqlin@xmut.edu.cn

$E_{\rm iso}$ 达到约 10^{47} J。但是，一直不能确认是否存在各向同性能超过约 10^{48} J 的 GRB，直到 GRB 221009A 的发现[3]。

GRB 221009A 是迄今观测到的具有最高各向同性能 ($E_{\rm iso} \approx 10^{48}$J)[3] 的伽马射线暴，被称为“史上最亮”(brightest-of-all-time, BOAT) 的暴，打破了最高光子能量、最亮伽马射线等宇宙中人类观测伽马射线暴的多项记录。它被多个卫星在所有的波段上探测到，如：Fermi/GBM (GCN 31565)[4]、Fermi-LAT (GCN 32637)[5]、Swift/BAT/XRT(GCN 32632)[6]、Konus-Wind (GCN 31604)[7]以及中国科学院高能物理研究所的三大科学装置——慧眼卫星 (Insight-HXMT)(ATel 15660)[8]、高能爆发探索者 (HEBS)(GCN 32751)[9]和中国高海拔宇宙线观测站 (LHAASO，拉索) (GCN 32677)[10]。尽管 GRB 221009A 是有史以来探测到的具有最高各向同性能的伽马暴，但是它的瞬时辐射和余辉特征都与已知的长暴分布延伸到高能阶段一致，这意味着它仍然可能是一颗大质量恒星死亡的结果，该恒星在驱逐其外层后坍缩形成黑洞或者磁星的典型释能机制[11]。这次坍缩产生的伽马射线爆发包含了一个狭窄的、高度准直的喷流（张角约 1.0°），周围环绕着更广泛的气体外流[3,11]。作为有史以来探测到的最亮的、离我们相对较近 ($z = 0.151$) 的伽马射线暴，GRB 221009A 可能给我们提供一个机会，揭示那些隐藏在较暗 GRB 爆发中的一些有趣特征[11]。

根据传统的观点，GRB 的辐射来源于相对论喷流，并且不管长暴还是短暴都是准直的，长暴具有典型的张角（约为 5°），但是对于相对论喷流是如何发射和准直的，喷流的几何结构和成分仍是一个长期存在的谜[3]。人们普遍认为长暴具有比较高的各向同性能和比较小的喷流张角，其核心区域比外部区域要明亮得多。GRB 表现出来的明亮度取决于喷流的内禀能量、喷流的张角和相对喷流的观测角。Laskar 等人[12]揭示，GRB 221009A 的异常亮度可能是由于喷流非寻常的准直程度，而不是本质上的高能量，即：不是喷流内禀的高能量导致 GRB 221009A 的异常亮度，较窄的喷流半张角 θ_j 和较小的相对喷流的观测角 $\theta'_{\rm obs}$ 才是导致 GRB 221009A 异常亮度的原因。有多个工作提出，GRB 221009A 的喷流张角和相对喷流的观测角比较小[12−17]，如：Zhang 等人[17]2024 年提出半张角 $\theta_{\rm j} \approx 0.6°$ 的垂直喷流 (pencil-beam jet)，An 等人[3]2023 年提出喷流半张角约等于 0.7°，Cao 等人[15]2023 年提出这个辐射可以用一个半张角为 $\theta_{\rm j} \approx 0.8°$ 的相对论喷流模型来解释，等等。综上所述，GRB 221009A 的辐射可能来源于迄今为止所观测到的最小的喷流张角。上述文献也考虑了喷流并没有沿着观测视线的情况，提出相对喷流的观测角可能很小，但是并没有给出具体确切的数值。Zou 等人[18]2018 年根据短暴的静止系的峰值能量 $E_{\rm p,i}$ 与各向同性能 $E_{\rm iso}$ 之间的关系式 $E_{\rm p,i} - E_{\rm iso}$，以及洛伦兹因子 Γ 与各向同性能 $E_{\rm iso}$ 之间的关系式 $\Gamma - E_{\rm iso}$，估算了 GRB 170817A 的观测角。这里我们用同样的方法估算 GRB 221009A 的观测视线与喷流边缘线的夹角 $\theta'_{\rm obs}$ 和洛伦兹因子 Γ。

2 理论方法和观测结果

2.1 理论方法

伽马射线暴能谱 νf_ν 的峰值能量 $E_{\rm p}$ 是 GRB 的重要物理量之一，它与一些观测量（如流量、光度或者各向同性能）之间存在相关性，如：Amati 等人[19]2002 年发现各向同性能 $E_{\rm iso}$ 与静止系中峰值能量 $E_{\rm p,\,i}$ ($E_{\rm p,\,i} = E_{\rm p}(1+z)$) 之间存在紧密的联系，即 $E_{\rm p,\,i} = C(E_{\rm iso,\,45})^{\eta}$。其中，$C$ 和 η 为比例系数，$E_{\rm iso,\,45} = E_{\rm iso}/10^{45}$ J。由于不同物理起源的 GRB 遵循不同的轨迹，所以在研究暴的能量特征时这个关系经常被作为一种独特的分类方案[20]。近期 Sun 等人[21]收集了从 1997 年 2 月到 2019 年 1 月已知红移的 45 个短暴和 275 个长暴数据，再次拟合了 Amati 关系，得到具有 1σ 不确定性的拟合参数：

$$\lg E_{\rm p,\,i} = C_1 + C_2 \lg E_{\rm iso} \quad , \tag{1}$$

其中，短暴 $C_1 = -15.61^{+2.51}_{-2.14}$，$C_2 = 0.36^{+0.04}_{-0.05}$，长暴 $C_1 = -17.83^{+0.93}_{-0.98}$，$C_2 = 0.39 \pm 0.02$，$E_{\rm p,\,i}$ 的单位为 keV.

作为理解 GRB 物理的另一个重要参数，$\varGamma$ 与 GRB 的一些观测量，如峰值能量 $E_{\rm p}$、各向同性能 $E_{\rm iso}$ 和各向同性光度 $L_{\rm iso}$ 也存在相关性，Liang 等人[22]2010 年得到洛伦兹因子 $\varGamma$ 和各向同性能 $E_{\rm iso}$ 间的关系式：

$$\lg \varGamma = C_3 + C_4 \lg E_{\rm iso,\,45} \quad , \tag{2}$$

其中，$C_3 = 2.26 \pm 0.03$，$C_4 = 0.25 \pm 0.03$，它们之间的相关系数 $\kappa = 0.91$。

考虑一个均匀且有陡变边缘模型的偏轴喷流，正轴的各向同性能 $E_{\rm iso,\,on}$ 与偏轴时各向同性能 $E_{\rm iso,\,off}$ 的关系，以及正轴的峰值能量 $E_{\rm p,\,on}$ 与偏轴时峰值能量 $E_{\rm p,\,off}$ 之间的关系分别为[23]：

$$E_{\rm p,\,off} = a^{-1} E_{\rm p,\,on} \quad , \quad E_{\rm iso,\,off} = a^{-3} E_{\rm iso,\,on} \quad . \tag{3}$$

设中心机制出来的喷流的半张角为 θ_j，$\theta_{\rm obs}$ 为视线与喷流轴间的夹角，$\theta'_{\rm obs} \equiv \theta_{\rm obs} - \theta_j$ 是偏轴观测视线与喷流边缘之间的夹角。则当洛伦兹因子 $\varGamma \gg 1$，且 $\theta'_{\rm obs} \ll 1$ 时，

$$a = \frac{1 - \beta \cos\theta'_{\rm obs}}{1 - \beta} \simeq 1 + (\varGamma \theta'_{\rm obs})^2 \quad , \tag{4}$$

其中，$\beta = \sqrt{1 - 1/\varGamma^2}$。

我们分别用观测的各向同性能 $E_{\rm iso}$ 和峰值能量 $E_{\rm p}$ 表示偏轴的各向同性能 $E_{\rm iso,\,off}$ 和峰值能量 $E_{\rm p,\,off}$，得到：

$$\lg \varGamma = C_3 + \frac{C_4}{1 - 3C_2}(3C_1 + 156C_2 - 3\lg E_{\rm p} + \lg E_{\rm iso,\,45}) \quad , \tag{5}$$

$$\lg a = \frac{1}{1 - 3C_2}(C_1 + 52C_2 - \lg E_{\rm p} + C_2 \lg E_{\rm iso,\,45}) \quad . \tag{6}$$

这样，我们就可以在已知 GRB 各向同性能和峰值能量的情况下，根据式 (5) 和 (6) 计算出洛伦兹因子 $\varGamma$ 和 a，再代入式 (4) 计算出偏轴观测视线与喷流边缘之间的夹角 $\theta'_{\rm obs}$。

2.2 观测结果

表 1 列出 GRB 221009A 观测的各向同性能 $E_{\rm iso}$ 和峰值能量 $E_{\rm p}$。对系数 C_1、C_2、C_3、C_4，根据它们的中心值和误差，按照高斯分布随机选取一系列数值（如各自选取 1 000 个数值），而 $E_{\rm iso}$ 和 $E_{\rm p}$ 也根据它们观测的中心值和误差，选取相同数量的数值，代入式 (5) 和式 (6) 进行计算, 得到一系列洛伦兹因子 Γ 和 a，再把结果代入式 (4) 得到一系列偏轴观测视线与喷流边缘的夹角 $\theta_{\rm obs}^{'}$，分别做出 Γ 和 $\theta_{\rm obs}^{'}$ 的分布如图 1 和图 2 所示。而这一系列 Γ 的平均值为 4.23×10^3，误差为 2.81×10^3，$\theta_{\rm obs}^{'}$ 的平均值为 $0.03°$，误差为 $0.01°$，我们的计算结果表明 $\Gamma=(4.23\pm2.81)\times10^3$，$\theta_{\rm obs}^{'}=(0.03\pm0.01)°$。

表 1　GRB 221009A 的观测数据

GRB	z	T_{90}	$E_{\rm iso}/(10^{45}{\rm J})$	$E_{\rm p}/{\rm keV}$	参考文献
221009A	0.151	325.8	$1\ 500\pm200$	$1\ 247.4\pm91.2$	[3,17]

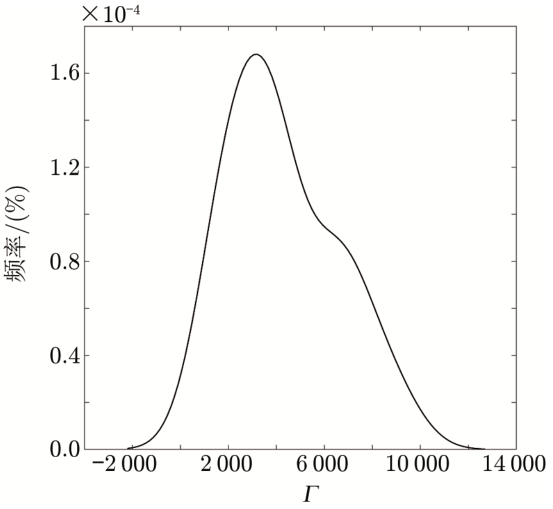

图 1　GRB 221009A 的洛伦兹因子 Γ 的分布

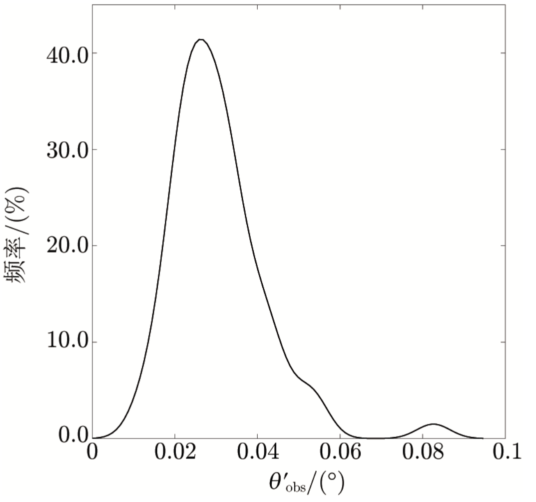

图 2　GRB 221009A 的偏轴观测视线和喷流边缘线之间的夹角 $\theta_{\rm obs}^{'}$ 的分布

3 讨 论

GRB 221009A 在瞬时阶段高能发射的异常强度可能是不同因素作用的结果：存在一个比较小的喷流张角，但能产生 $E_{\rm iso}\approx10^{48}$ J 的能量爆发（即较高的喷流内禀能量）；存在一个相对较小的观测角 $\theta_{\rm obs}$（GRB 喷流轴与观测者视线之间的夹角）；相对其他 GRB，它离地球较近 ($z=0.151$)。而 Laskar 等人排除了喷流内禀的高能量导致 GRB 221009A 异常亮度的原因，所以喷流的张角 $\theta_{\rm j}$ 和相对喷流的观测角 $\theta_{\rm obs}$ 也许是解释 GRB 221009A 异常亮度的两个重要因素。

GRB 静止系的峰值能量 $E_{\mathrm{p,i}}$ 与一些观测量，如：流量 F，各向同性光度 L_{iso} 或者各向同性能 E_{iso} 之间都存在相关性。同时，洛伦兹因子$\varGamma$ 对于理解 GRB 物理也是一个很重要的参数。理论上说，预测的 $E_{\mathrm{p,i}}$ 不仅仅依赖于各向同性光度 E_{iso}，也依赖于外流初始的洛伦兹因子 $\varGamma$[22]。在这个工作中，我们根据长暴的 $E_{\mathrm{p,i}}$-E_{iso} 和 $\varGamma$-E_{iso} 关系估算 GRB 221009A 的观测视线与喷流边缘的夹角 θ'_{obs} 和洛伦兹因子 $\varGamma$，得到 $\varGamma = (4.23 \pm 2.81) \times 10^3$，$\theta'_{\mathrm{obs}} = 0.03° \pm 0.01°$。本文利用长暴的 $E_{\mathrm{p,i}}$-E_{iso} 与 $\varGamma$-E_{iso} 关系作为估算的依据，也可以用其他观测量之间的关系以及它们与 $\varGamma$ 之间的关系对偏轴观测角进行计算。我们还利用 $\varGamma$-L_{iso}[24] 关系和 $E_{\mathrm{p,i}}$-L_{iso}[25] 关系对 GRB 221009A 的 θ'_{obs} 和 $\varGamma$ 进行估算，结果为 $\theta'_{\mathrm{obs}} = 0.02° \pm 0.01°$，$\varGamma = (2.31 \pm 0.65) \times 10^3$。两种计算结果基本上一致。这个结果表明观测视线与喷流边缘的夹角很小，这说明对 GRB 221009A 的观测是正轴的，而这可能是 GRB 221009A 具有最高各向同性能的原因之一。当然，也可以用 L_{iso}-$E_{\mathrm{p,i}}$-$\varGamma$[22] 关系来代替 $\varGamma$-E_{iso} 或者 $\varGamma$-L_{iso} 关系，估算 GRB 221009A 的观测角和洛伦兹因子。

为简单起见，我们用 $\theta'_{\mathrm{obs}} \equiv \theta_{\mathrm{obs}} - \theta_{\mathrm{j}}$ 作为偏轴的框架变换[18]。实际上，更细致的计算应该包括 θ_j 内不同角度的影响以及相应的到达时间。同时，我们在研究过程中也没有考虑结构喷流的情况。如果考虑结构式喷流，要求采用不同的模型并并判断出适用于这个暴的最优模型，这可能不是决定性的。所以，即使考虑到喷流张角 θ_j 和喷流的结构，θ'_{obs} 仍然可以作为一个有效的偏轴角。

多名研究者提出了 GRB 221009 喷流的小张角模型，Zhang 等人[17]认为这种张角很小的垂直喷流可能存在于大量的 GRB 样本中，但却逃脱了检测，在余辉阶段的后期也可能探测不到。在 GRB 喷流模型结构的假设下，GRB 221009A 的喷流张角比较小意味着从地球上可以看到结构喷流中最亮的核心，结合该暴的低红移解释了该暴的高流量和高各向同性能[15]。我们可以预测有更多的各向同性能 $E_{\mathrm{iso}} \geqslant 10^{48}$ J 的 GRB 位于更高红移处 ($z > 0.15$)，但是它们的红移没有被测出来，从而 E_{iso} 未知，或者也有可能不是所有的 GRB 都有这样一个狭窄明亮的核心[3]。

致谢

感谢华中科技大学邹远川教授的积极讨论。特别感谢审稿老师的仔细评审以及提出来的宝贵意见。

参考文献：

[1] Kouveliotou C, Meegan C A, Fishman G J, et al. ApJL, 1993, 413: 101
[2] Lan L, Gao H, Xiao S, et al. ApJL, 2023, 949: 4
[3] An Z H, Antier S, Bi X Z, et al. https://arxiv.org/pdf/2303.01203.pdf, astro-ph/2303.01203, 2003
[4] Lesage S. GRB Coordinates Network, 2022, 31565: 1
[5] Bissaldi E, Omodei N, Fermi-LAT Team. GRB Coordinates Network, 2022, 32637: 1
[6] Dichiara S, Gropp J D, Kennea J A, et al. GRB Coordinates Network, 2022, 32632: 1
[7] Svinkin D, Frederiks D, Ulanov M, et al. GRB Coordinates Network, 2022, 31604: 1
[8] Tan W J, Li C K, Ge M Y, et al. The Astronomer’s Telegram, 2022, 15660: 1

[9] Liu J C, Zhang Y Q, Xiong S L, et al. GRB Coordinates Network, 2022, 32751: 1
[10] Huang Y, Hu S, Chen S, et al. GRB Coordinates Network, 2022, 32677: 1
[11] Song X Y, Zhang S Z. ApJ, 2023, 957: 31
[12] Laskar T, Alexander K D, Margutti R, et al. ApJL, 2023, 946: 23
[13] Bright J S, Rhodes L, Farah W, et al. Nature Astronomy, 2023, 7: 986
[14] Negro M, Di Lalla N, Omodei N, et al. ApJL, 2023, 946:21
[15] Cao Z, Aharonian F, LHAASO Collaboration, et al. Science, 2023, 380: 1390
[16] Tavani M, Piano G, Bulgarelli A, et al. ApJL, 2023, 956: 23
[17] Zhang B, Wang X Y, Zheng J H. Journal of High Energy Astrophysics, 2024, 41: 42
[18] Zou Y C, Wang F F, Moharana R, et al. ApJL, 2018, 852: 1
[19] Amati L, Frontera F, Tavani M, et al. A&A, 2002, 390: 81
[20] Zhang B, Zhang B B, Virgili F J, et al. ApJ, 2009, 703: 1696
[21] Sun H, Wang C W, Yang J, et al. https://arxiv.org/pdf/2307.05689.pdf, astro-ph/2307.05689, 2023
[22] Liang E W, Yi S X, Zhang J, et al. ApJ, 2010, 725: 2209
[23] Rybicki G B, Lightman A P. Radiative processes in astrophysics, New York: Wiley-Interscience, 1979: 112
[24] Lu J, Zou Y C, Lei W H, et al. ApJ, 2012, 751: 49
[25] Ghirlanda G, Ghisellini G, Firmani C. New Journal of Physics, 2006, 7: 123

The Viewing Angle Limitation of GRB 221009A

LIN Yiqing[1,2]

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Devices, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. School of Opto-electronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: Long gamma-ray burst (GRB) GRB 221009A, known as the "rightest-of-all-time" (BOAT), triggered all satellites equipped for transient detection in all wavelengths. Relative to other GRBs ever detected by the humanity in the past half century, the fluence and peak flux of GRB 221009A are the highest. At a redshift of $z = 0.151$, GRB 221009A holds the record of the highest ever measured isotropic energy $E_{\rm iso}$. Prompt gamma-ray emission is thought to be the result of a highly relativistic and collimated jet with a small inclination angle with respect to the Earth. Thus, the measured isotropic energy may depends on the intrinsic energy of the jet, the opening angle of the jet, and the viewing angle of the relative jet. Here we use the relations $E_{\rm p,i}$-$E_{\rm iso}$ and Γ-$E_{\rm iso}$ of the long burst to determine the viewing angle $\theta^{'}_{\rm obs}$ and the Lorentz factor Γ of long GRB 221009。 Our results show $\Gamma = (4.23 \pm 2.81) \times 10^3$ and $\theta^{'}_{\rm obs} = 0.03^\circ \pm 0.01^\circ$ for long GRB 221009A. The result indicates that for GRB 221009A, the viewing angle between the line of sight and the jet edge of GRB 221009A is very small. That is, GRB 221009A may be a positive axis observation, which may be one of the reasons that GRB 221009A has the highest $E_{\rm iso}$.

Key words: gamma-ray burst; jet; relativistic processes